

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

კახაბერ გიგიტელაშვილი

სითხისა და გაზის დინების შესწავლა პროგრამული  
პაკეტის გამოყენებით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ა კ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი  
2012

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტზე

თბო და ჰიდროენერგეტიკის დეპარტამენტი

თბოენერგეტიკული დანადგარების  
სასწავლო-სამეცნიერო მიმართულება

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: აკადემიური დოქტორი, ტ.მ.კ. დ.კილურაძე

რეცენზენტები:

ჯემალ კილასონია, ტექნ.მეცნ.დოქტორი- სტუ-ს თბო და  
ჰიდროენერგეტიკის დეპარტამენტის ჰიდროენერგეტი-  
კული დანადგარებისა და სამილსადენო სისტემების  
სასწავლო-სამეცნიერო მიმართულების სრული  
პროფესორი;

ნოდარ მირიანაშვილი, ტექნ.მეცნ.დოქტ. სტუ-ს არჩილ ელიაშვილის  
მართვის სისტემების ინსტიტუტის მთავარი მეცნიერ-  
თანამშრომელი

დაცვა შედგება ----- წლის “-----“ ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----  
----- ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს  
კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა –სტუ-ს ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,

ტ.მ.დ. სრული პროფესორი

გ.ხელიძე

## Summary

Proper preparation of qualified specialists envisages theoretical learning and wide application of virtual laboratorial base.

First of all visualization of hydrodynamic processes is important for learning process. Visual images and animated images, which are used during lections and seminars, significantly facilitate ability to comprehend the theory. Facilitation of formation of hydrodynamic intuition among listeners is even more important.

Students of heat-and-power engineering specialty in their basic education have a lot of themes, which need arrangement of complex laboratorial base, which at its own turn requires large expenses. Advantage of virtual laboratorial tasks consists in easiness of evaluation of an impact of change in technological parameters on an average process and making an optimal decision. The work deals with contemporary improved program packages FLUENT and GAMBIT, which are used for modeling.

Examples, methods considered in the works from the point of view of computer modeling and received illustrations will enable the student to become competent in computer modeling of processes, which occur in thermal power aggregate and use it in settlement of a range of technical tasks and implementation of scientific works. Aim of the given work from one side is to establish virtual laboratorial base and from another side to implement research works by means of application of computer programs. The main theme for description of aerohydrodynamics and thermal transmission process is studying of the law of flux creep.

The problem of computer modeling in different regimes of isothermal flow in peripheral tube has been settled. Net in the program GAMBIT is established taking into consideration the fact that the net is more narrow-meshed in places, where the gradient of velocity is higher neat the tube wall, for receiving more information.

It is clearly illustrated (by vectors of flow velocity) that during the laminar flow separate layers of fluid flow towards each other in such a manner that they do not mix. There is shown a picture of stabilization of speed performance curve, which ends with parabolic distribution of speed.

Similarly is illustrated complex picture of current movement of particles of liquid with constantly changing trajectory during turbulent regime and current movement of particles intensively mixed. Also there is shown a process of establishment of velocity profile on stable sections by receiving cut parabola.

Quantitative difference, caused by difference of kind between laminar and turbulent movements is also shown. Namely, different patterns of distribution of velocity in sections of the tube are shown. Contrastive picture of laminar and turbulent regimes of liquid flow is illustrated.

One of practical tasks is studying of the process of flow around the body different figures (circle,  $3/4$ ,  $1/2$  and  $1/4$  of circle) sinking in liquid by creeping regime. On the basis of computer modeling pictures of flow around the body of these figures by glycerin are received (velocity potential, velocity vector, speed performance curve in specific sections and in case of flow reverse). Diameter of circle amounts to 20 mm, velocity of flow is changed in scope of 1.0-4.7 mm/sec., and the average meaning of the Reynolds' number equals  $Re_L = 0.117$  (arcs of figures are taken for determinant geometric magnitude). It is shown that in case of flow reverse pictures of the flow around the body are practically symmetric.

Distance of  $0.52d$  between pairs of vortexes, caused by flow around the semicircle by glycerin is determined, which differs from experimentally received figure by 9%; it may be connected to difference between thermophysical properties of glycerin and the Reynolds' numbers.

The work also deals with virtual determination of tasks of flow around the body of different extensions and cavities, which are widespread in practice. Distinctive parameter of cavities is  $k=b/h$  ( $k=3-0.25$ ), correlation of width of cavities -  $b$  to the depth -  $h$ .

Analysis of processes has shown, that reduction of  $k$  figure in the cavity two vortex zones are changed one wide stretched vortex, afterwards one concentrated vortex and in the end a large amount of consecutive vortexes are established beyond each other.

Evaluation of consumption knots for specific terms of exploitation, when standard requirements for measuring knots are not maintained (removal of compression – in the form of extension on the internal part of the tube), stipulates additional systematic errors and distorts results of measurements.

Modeling of a specific task has been implemented:  $70^{\circ}\text{C}$  water flows in a bare tube with consumption  $27\text{ m}^3/\text{sec}$ . Before entering the tube pressure of liquid in the section equals 5 ata. Inner diameter of the tube is 150 mm, diameter of aperture of diaphragm – 80 mm. Module of diaphragm  $m=802/1502=0.284$ . Coefficient of consumption equals 0.631. In this case the Reynolds' limiting value  $Re=84711$ . As Reynolds' practical value exceeds its limit value the coefficient of consumption will not depend on the Reynolds' number.

According to the process of modeling in case with bare tube pressure drop on diaphragm amounted to 299 mm.Hg., in case of extension in two sections: before excitation of the flow and drop of pressure in minimal section increased by resistance of extension and correction on the extension equals  $K_{ext}=1.02$ . Correspondingly, coefficient of consumption amounts to 0.644 and consumption equals to  $27.54\text{ m}^3/\text{sec}$ . Thus, by means of computer modeling it is possible to reveal systematic errors and by introduction of corresponding corrections to update results of measurements.

In tubing of thermal power plants and many fields of industry it is frequent that flows of liquids with different temperature mix with each other. For correct engineering of system it is important to predict consumption and temperature of substance in the area of mixing. The work deals with computer modeling of the above-mentioned process: cold liquid (water) with temperature  $20^{\circ}\text{C}$  and velocity  $0.2\text{ m/sec}$  flows into 400 mm diameter tube and mixes with  $40^{\circ}\text{C}$  warm water, which flows into the arm from 100mm diameter tube. (Velocity of warm water in the tube on the entrance changes within diapason of  $1\text{ m/sec} - 100\text{ m/sec}$ ).

The net is arranged beforehand for modeling of the process of mixing, which consists of triangles (specifically 1215 triangles). Calculation is implemented for standard turbulent model. Equations of corresponding heat exchange energies between each triangle are activated in the above-mentioned program.

Pictures of temperature and velocity fields before and after mixture of flows and diagram of distribution of velocity and temperature in fluid outlet angle are received, which allows implementation of quantitative analysis.



## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა კვალიფიციური სპეციალისტების მოსამზადებლად, რომელთა დარგობრივი კომპენტენციები დააკმაყოფილებს თანამედროვე მოთხოვნებს, სწავლების პროცესში თეორიულ სწავლებასთან ერთად ვირტუალური ლაბორატორიული ამოცანების ფართოდ გამოყენება აქტუალურია.

ვირტუალური ლაბორატორიული ამოცანების შექმნა შესაძლებელია, დღეისათვის ერთ-ერთი ყველაზე უფრო დახვეწილი და სრულყოფილი ჰიდროაეროდინამიკური პროგრამების FLUENT-ის და GAMBIT-ის გამოყენებით.

სითხის ან აირის მოძრაობის მოდელირებისათვის ეს პროგრამები ფართოდ გამოიყენება ისეთ სფეროებში, როგორებიცაა: ავიაცია, ენერგეტიკა, საავტომობილო ინდუსტრია, ქიმია, ფიზიკა და სხვა. მათი მომხმარებლებია ისეთი ცნობილი ფირმები, როგორებიცაა “ბოინგი”, “ბმვ” და სხვა.

თბოენერგეტიკული სპეციალობის სტუდენტების საბაზო განათლების დისციპლინებში მრავლადაა ისეთი თემები, რომლებიც საჭიროებენ რთული ლაბორატორიული ბაზის მოწყობას, რაც დიდ ხარჯებთანაა დაკავშირებული. ვირტუალური ლაბორატორიული ამოცანების უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ კომპიუტერულ მოდელზე მარტივადაა შესაძლებელი ტექნოლოგიური პარამეტრების ცვლილების გავლენის შეფასება საერთო პროცესზე და ოპტიმალური გადაწყვეტების პოვნა. ნაშრომში მოდელირებისათვის გამოყენებულია თანამედროვე სრულყოფილი პროგრამული პაკეტი FLUENT და GAMBIT.

ეს პროგრამები წარმატებით შეიძლება გამოყენებული იქნას სასწავლო მიზნებთან ერთად კვლევითი სამუშაოების ჩასატარებლად.

**სამუშაოს მიზანი და ძირითადი ამოცანები.** სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს სწავლების ყველა საფეხურზე (უმაღლესი პროფესიული, ბაკალავრიატი, მაგისტრატურა) თბოენერგეტიკოსების უკეთ

მომზადებისათვის, მაპროფილებელ საგნებში შეიქმნას ძირითადი თემების მიხედვით ვირტუალური ლაბორატორიული ბაზა, რომელიც დახმარებას გაუწევს მათ თეორიული ცოდნის ათვისებასა და გადრმავეებაში. მიღებული დარგობრივი კომპენტენცია, კომპიუტერული მოდელირების სფეროში, სპეციალისტს ხელს შეუწყობს დასაქმების საკითხში და მას შესაძლებლობა ექნება წარმატებით გადაჭრას სამაცნიერო თუ ტექნიკური საკითხები.

კონკრეტულად, სამეცნიერო-კვლევითი მიმართულებით სამუშაო მიზნად ისახავს სამეცნიერო კვლევის შესრულებას ვიწროვდებადი მოწყობილობით ნივთიერებათა ხარჯის განსაზღვრის პროცესის კომპიუტერული მოდელირების გზით, დიაფრაგმის წინ შემამჭიდროებელი საფენის შესაძლო შვერილით გამოწვეული გაზომვის ცდომილების შესწავლას. ასევე სხვადასხვა სიჩქარეებისა და ტემპერატურების მქონე სითხეების შერევის მოდელირების შესრულებას ტემპერატურის და სიჩქარის ველების დადგენის მიზნით, შერევის შედეგად თბოცვლის გათვალისწინების შემთხვევაში.

დასახული მიზნის მისაღწევად სამუშაოს ძირითად ამოცანებს წარმოადგენს:

- სასწავლო გეგმის მიხედვით მაპროფილებელი საგნების შესაბამისი თემების და კონკრეტულად საკითხების შერჩევა, რომლისთვისაც უნდა შეიქმნას კომპიუტერული ვირტუალური ლაბორატორიული ბაზა;
- ტექნოლოგიური პროცესების მოდელირების სწავლება;
- კომპიუტერული პროგრამების FLUENT-ის და GAMBIT-ის ძირითადი შესაძლებლობების და მუშაობის ელემენტების სწავლება;
- კომპიუტერული პროგრამების ადაპტაცია ვირტუალური ლაბორატორიული ამოცანების შესაქმნელად;
- ვიწროვდებადი მოწყობილობით ნივთიერებათა ხარჯის განსაზღვრის პროცესის კომპიუტერული მოდელირების გზით, დიაფრაგმის წინ შემამჭიდროებელი საფენის

შესაძლო შვერილით გამოწვეული გაზომვის ცდომილების შესწავლა;

- სხვადასხვა სიჩქარეებისა და ტემპერატურების მქონე სითხეების შერევის მოდელირების შესრულებას ტემპერატურის და სიჩქარის ველების დადგენის მიზნით, შერევის შედეგად თბოცვლის გათვალისწინების შემთხვევაში.

### **მიღებული შედეგების სამეცნიერო სიახლე.**

1. ნაშრომის სამეცნიერო სიახლეა საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში სწავლების პროცესში ჰიდროაეროდინამიკური კომპიუტერული პროგრამების FLUENT და GAMBIT-ის გამოყენების დანერგვა და ახალი ვირტუალური ლაბორატორიული ბაზის შექმნა.
2. ვიწროვდებადი მოწყობილობით ნივთიერებათა ხარჯის განსაზღვრის პროცესის კომპიუტერული მოდელირება, დიაფრაგმის წინ შემამჭიდროებელი საფენით შესაძლო შვერილით გამოწვეული გაზომვის ცდომილების დადგენა.
3. სხვადასხვა სიჩქარეებისა და ტემპერატურების მქონე სითხეების შერევის მოდელირება ტემპერატურის და სიჩქარის ველების დადგენის მიზნით, შერევის შედეგად თბოცვლის გათვალისწინების შემთხვევაში.

**კვლევის მეთოდები და მიღებული შედეგების უტყუარობა.** გამოკვლევები ტარდება პერსონალურ კომპიუტერზე ავტორის მიერ შემუშავებული კომპიუტერული მოდელისა და ფართოდ აპრობირებული უნივერსალური ალგორითმის საფუძველზე. ნაკადების მოძრაობის ჰიდროაეროდინამიკური რეჟიმები შეისწავლება ორ (2D) და სამ (3D) განზომილებაში, კომპიუტერული პროგრამების FLUENT და GAMBIT-ის გამოყენებით.

**სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება და შედეგების დანერგვა.** სამუშაოს პრაქტიკულ ღირებულება მდგომარეობს იმაში, რომ ვირტუალური ლაბორატორიული ბაზის შექმნა ხელს შეუწყობს მაღალკვალიფიციური სპეციალისტების მომზადებას. კომპიუტერული მოდელირების ირგვლივ მიღებული ცოდნა და გამოცდილება კარგ პერსპექტივას იძლევა პრაქტიკული საწარმოო ამოცანების წარმატებით

შესწავლის და გადაჭრის და სამეცნიერო მუშაობის წარმართვის მიმართულებით.

პროგრამული პაკეტებით FLUENT და GAMBIT ჩატარებული მოდელირების საფუძველზე შესწავლილი ხარჯის საზომი კვანძის დიაფრაგმის შემამჭიდროებელი საფენის არასწორი მონტაჟის დროს მილსადენში წარმოქმნილი შევრილის გავლენა გაზომვის სიზუსტეზე, გაზომვის შედეგში შესწორების შეტანის გზით ცდომილების შემცირების საშუალებას იძლევა.

პროგრამული პაკეტებით FLUENT და GAMBIT ჩატარებული მოდელირების საფუძველზე შესწავლილი განსხვავებული ტემპერატურისა და სხვადასხვა სიჩქარის მქონე წყლის შერევის ამოცანა.

**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა.** დისერტაციის ტექსტი შედგება შესავლის, სამი თავის, დასკვნის, რეზიუმის, 51 დასახელების გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალისაგან. დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 122 გვერდს 3 ცხრილისა და 108 ნახაზის ჩათვლით.

### **სამუშაოს მოკლე შინაარსი**

**თავი I** ეძღვნება სითხისა და გაზის დინების რეჟიმების, სხვადასხვა სხეულების გარსდენის, სასაზღვრო შრის და ნაკადის მოწყვეტის, პრაქტიკაში გამოყენებული სხვადასხვა თბომტარების (წყალი, ჰაერი, კვამლის აირები, გლიცერინი, სატრანსფორმატორო ზეთი, თხევადი ლითონები) სიბლანტის მაჩვენებლების საკითხებს.

განხილულია სითხის დინების სახეები:

- არაგრიგალური (პოტენციური) და გრიგალური. პირველ შემთხვევაში ნაწილაკები არ ბრუნავს, ხოლო მეორე შემთხვევაში ადგილი აქვს ნაწილაკების ბრუნვას თავისი მყისიერი ცენტრის გარშემო გარკვეული კუთხური სიჩქარით;
- დამყარებული (სტაციონარული) და დაუმყარებელი. პირველ შემთხვევაში თითოეული ნაწილაკის სიჩქარე არ იცვლება დროის მიხედვით, ხოლო მეორე შემთხვევაში სიჩქარე ცვალებადია დროის მიხედვით; დამყარებული მოძრაობა თავის მხრივ შეიძლება იყოს თანაბარი და არათანაბარი დაწნევით და უდაწნეო მოძრაობა.

პირველ შემთხვევაში ნაკადი მთლიანად ავსებს კვეთს, ხოლო მეორე შემთხვევაში ნაკადს აქვს თავისუფალი ზედაპირი;

- ღამინარული და ტურბულენტური. პირველ შემთხვევაში ყოველი ნაწილაკი გადადგილდება ერთმანეთისა და გეომეტრიული ღერძის პარალელურად ისე, რომ ერთმანეთთან შერევა არ ხდება (არ გადადგილდებიან განივად). არ ხდება სიჩქარისა და წნევის პულსაციები. მეორე შემთხვევაში ნაწილაკები მოძრაობენ დროის მიხედვით ცვლადი მრუდწირული ტრაექტორიებით და ადგილი აქვს მათ შერევას განივი მიმართულებით. ასევე ადგილი აქვს სიჩქარისა და წნევის პულსაციებს.

სითხის ან აირის მოძრაობის მოდელირებისათვის მსოფლიოს წამყვან უნივერსიტეტებში გამოყენებულია ჰიდროაეროდინამიკური პროგრამები FLUENT და GAMBIT. მოყვანილია ზოგიერთი პრაქტიკული ამოცანების (ვენტილატორები, პულსაციური ხარსაზომი, თვითმფრინავის ფრთის, ტურბინის როტორისა და სტატორის გარსდენა და სხვა ) კომპიუტერული მოდელირების მაგალითები.

ჰიდროდინამიკის მეცნიერების განვითარების ადრეულ ეტაპზე სითხეებისა და გაზების დინებების თეორიული შესწავლა ხდებოდა იმ დაშვებით, რომ სითხე არის იდეალური (სრულყოფილი), ანუ არ ხასიათდება ხახუნით და ამასთან ერთად არის არაკუმშვადი.

სითხეების დინებისას ხახუნის გარეშე მის ცალკეულ ფენებს შორის წარმოიშობა მხოლოდ ნორმალური ძალები (წნევის ძალები), მხები ძალები, ანუ ძვრის ძალები არ მოქმედებენ. ე.ი. იდეალურ სითხეებში არ მოქმედებენ მხები ძალები და სითხეებში არ არსებობს ხახუნის წინააღობა. იდეალური სითხეების თეორია ვერ ხსნის სითხეში მოძრავი სხეულის წინააღობის მოვლენას.

უშუალოდ კედლის სიახლოვეს სითხის დინებაზე გადამწყვეტ გავლენას ახდენს ის გარემოება, როგორიცაა კედლის სიმტკიცე, მისი შეუღწევადობა და სითხის მიკვრა (მიწებწბა) ზედაპირზე.

მე-19 საუკუნის ბოლოს მეცნიერება სითხის მოძრაობის შესახებ გაყოფილი იყო ერთმანეთისაგან ძალიან დაცილებულ ორ მიმართულებად: ერთის მხრივ დიდ სრულყოფამდე მივიდა თეორიული ჰიდროდინამიკა, რომელიც ეყრდნობოდა ხახუნის გარეშე სითხეების

დინების ეილერის განტოლებებს და მეორეს მხრივ ტექნიკის მიერ წამოყენებული პრაქტიკული ჰიდრაულიკა. მიღებული თეორიული შედეგები მკვეთრად განსხვავებული იყო პრაქტიკული შედეგებისაგან. ამიტომ კლასიკური ჰიდროდინამიკის როლი პრაქტიკისათვის უმნიშვნელო იყო. თეორიულ და პრაქტიკულ მონაცემებს შორის დიდი განსხვავება გამოწვეული იყო, იმით, რომ თეორიულ ჰიდროდინამიკაში უგუვებელყოფილი იყო სითხეში ნაწილაკებს შორის და მათი კედელთან მომქმედი ხახუნის ძალები.

თეორიული ჰიდრომექანიკისა და ჰიდრაულიკის დაახლოება შესაძლებელი გახდა გერმანელი მეცნიერის პრანდტლის (1904წ) მიერ წამოყენებული სასაზღვრო შრის ჰიპოთეზის წყალობით [4]. პრანდტლმა ცდებით აჩვენა, რომ ზედაპირის სიახლოვეს სითხის დინება შეიძლება გაიყოს ორ არედ: ზედაპირის ახლოს ძალიან თხელი ფენა (სასაზღვრო შრე), სადაც ხახუნი თამაშობს მნიშვნელოვან როლს და არედ ამ ფენის გარეთ სადაც ხახუნის ძალები შეიძლება უგუვებელყოფილი. ამ ჰიპოთეზის გამოყენებით თეორიული ჰიდროდინამიკა სწრაფად განვითარდა და უფრო სრულყოფილი გახდა. ამჟამად მჭიდრო კავშირია თეორიულ და ექსპერიმენტულ კვლევებს შორის, რომელიც დამყარდა სასაზღვრო შრის ჰიპოთეზის წყალობით.

**თავი II.** ეძღვნება ვირტუალური ლაბორატორიული ბაზის შექმნას სითხის დინების პროცესების შესასწავლად. თბოტექნიკური პროცესების მიმდინარეობის ხასიათს მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ამ პროცესებთან მჭიდროდ დაკავშირებული ნაკადების ჰიდროაეროდინამიკური რეჟიმები.

ჰიდროდინამიკური პროცესების დაკვირვებისათვის ნაკადის დინებების ვიზუალიზაციას უძველესი დროიდან ენიჭებოდა მნიშვნელოვანი როლი. ექსპერიმენტულად შესწავლილია ვიწრო ღრეჩოში (Instrument Hele-Shaw) სხვადასხვა სხეულების გარსდენის სურათები. იგი იძლეოდა მოვლენის ხარისხობრივი გაგებისა და ბოლო პერიოდში კი უკვე რაოდენობრივი შეფასების შესაძლებლობას. ლიტერატურაში მოცემულია აშშ, ინგლისის, საფრანგეთის, იაპონიის და სხვა ქვეყნების სპეციალისტების ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები სითხეებისა და გაზების სხვადასხვა პირობებში დინების

ამსახველი ფორტების სახით. ამ მასალების კლასიფიკაცია, დამუშავება და კომენტარები შესრულებულია ცნობილი ამერიკელი მეცნიერის მილტონ ვან-დაიკის მიერ. ეს წიგნი უნიკალურია იმიტომაც, რომ ჰიდროდინამიკის არსებობის ორნახევარი საუკუნის პერიოდში იგი ამ სახის ერთად-ერთი ნაშრომია.

შემდგომში კომპიუტერული ტექნიკის განვითარებამ უფრო მეტი შესაძლებლობები შექმნა რთული ჰიდროდინამიკური პროცესების შესასწავლად.

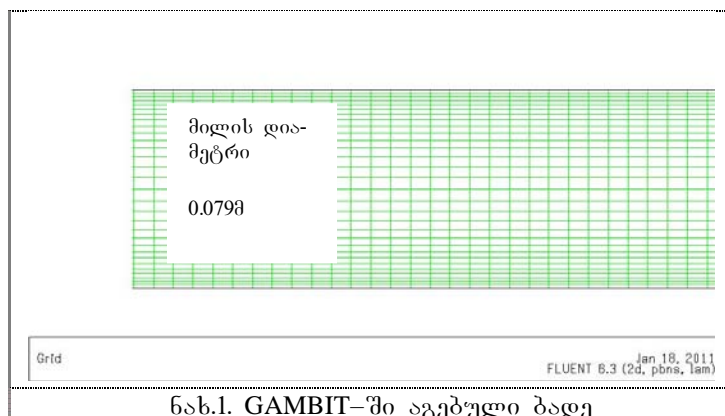
სითხის ან აირის მოძრაობის მოდელირებისათვის გამოყენებულია ჰიდროაეროდინამიკური პროგრამები FLUENT და GAMBIT. ამ პროგრამებთან მუშაობა მოიცავს სამ ძირითად ეტაპს: 1. ბადის გენერირება პროგრამა GAMBIT-ში და ნახაზის გადატანა პროგრამა FLUENT-ში; 2. გამოთვლების ჩატარება FLUENT-ში; 3. შედეგების დოკუმენტირება Word-ში.

პროგრამა FLUENT-ში გამოთვლების ჩატარება შესაძლებელია როგორც ორ, ასევე სამ განზომილებიან არეში (2D და 3D). მეორე ეტაპის წინ საჭიროა შევიტანოთ ნაკადის საწყისი მონაცემები: სიჩქარე, ტემპერატურა, წნევა, სიმკვრივე, დინების სახე და სხვა. ბოლო ეტაპზე შეიძლება განისაზღვროს ნაკადის სიჩქარე, სიჩქარის ვექტორი, წნევა, ტემპერატურა სასურველ წერტილებში და აგრეთვე ნაკადის ნებისმიერ კვეთში შეიძლება მივიღოთ სიჩქარისა და წნევის პროფილი. პროგრამული პაკეტების გამოყენებით ჩატარებულია სხვადასხვა პროცესების მოდელირება და შექმნილია ვირტუალური ლაბორატორიული ამოცანები.

### **1. ნაკადების მოძრაობის ლამინარული და ტურბულენტური რეჟიმები**

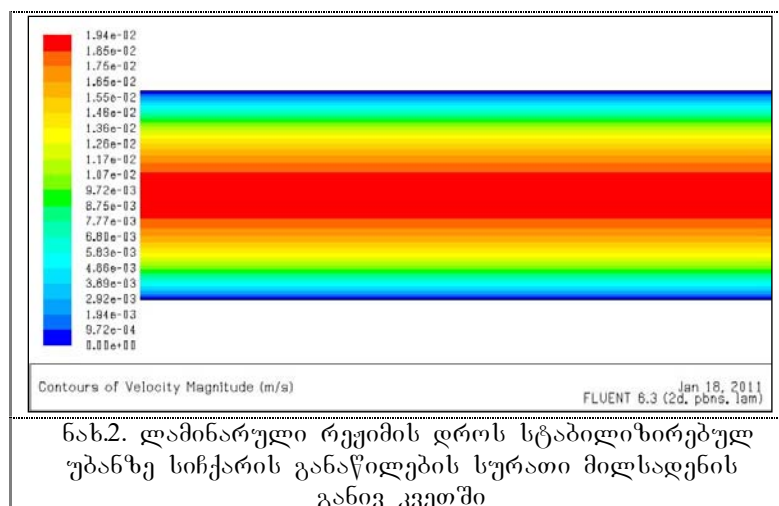
მოდელირება შესრულებულია წრიულ მილში სითხის (წყალი) იზოთერმული დინების სხვადასხვა რეჟიმებისათვის. მილის დიამეტრია  $d=0.079\text{მ}$  და ერთ შემთხვევაში წყლის საშუალო სიჩქარე მილში შესვლაზე ტოლია  $0.013\text{მ/წმ}$  (ლამინარული რეჟიმი), ხოლო მეორე შემთხვევაში-  $1.27\text{მ/წმ}$  (ტურბულენტური რეჟიმი). ლამინარული რეჟიმის შესაბამისი რეინოლდსის რიცხვი ტოლია  $Re = 1021$ , ხოლო ტურბულენტური რეჟიმისათვის  $Re = 99732$ . ნახ.1 -ზე ნაჩვენებია GAMBIT-

ში შესრულებული ბადე. მეტი ინფორმაციის მისაღებად ბადე მილის კედელთან უფრო ხშირია.



ნახ.1. GAMBIT-ში აგებული ბადე

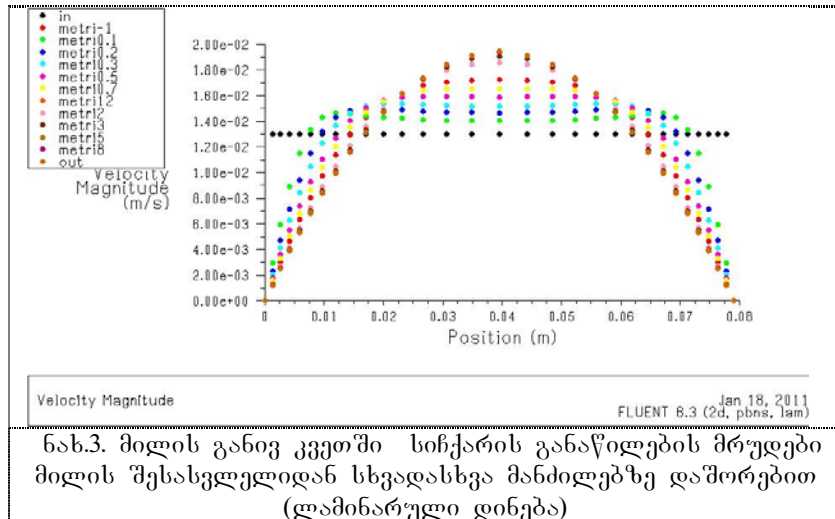
ნახ.2-ზე მოცემულია ლამინარული რეჟიმის დროს სტაბილიზირებულ უბანზე მილსადენის განივ კვეთში სიჩქარის განაწილების სურათი.



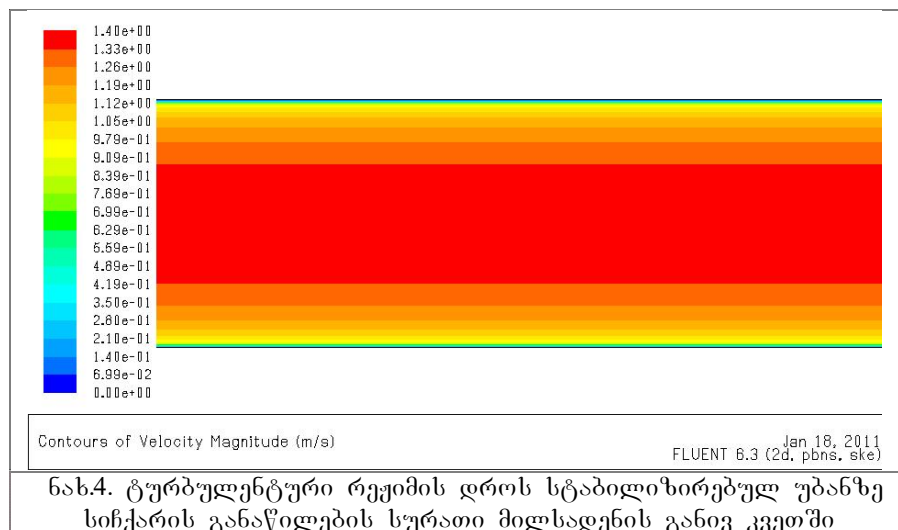
ნახ.2. ლამინარული რეჟიმის დროს სტაბილიზირებულ უბანზე სიჩქარის განაწილების სურათი მილსადენის განივ კვეთში

ნახ.3-ზე მოცემულია ნაკადის ლამინარული რეჟიმის დროს მილსადენის განივ კვეთში სიჩქარეთა განაწილების მრუდები მილსადენის შესასვლელიდან სხვადასხვა მანძილზე დაშორებით (1 დან 8 მეტრამდე). საბოლოოდ სტაბილურ უბანზე განაწილების მრუდს აქვს პარაბოლის სახე. საშუალო სიჩქარე ტოლია 0.013მ/წმ.





ნახ.4-ზე ნაჩვენებია ტურბულენტური რეჟიმის დროს სტაბილიზირებულ უბანზე მილსადენის განივ კვეთში სიჩქარის განაწილების სურათი. კედელთან სიჩქარე ნულის ტოლია და კედლიდან მცირე მანძილით დაშორებულ ნაკადის გულში სიჩქარე უკვე პრაქტიკულად მუდმივი სიდიდეა.



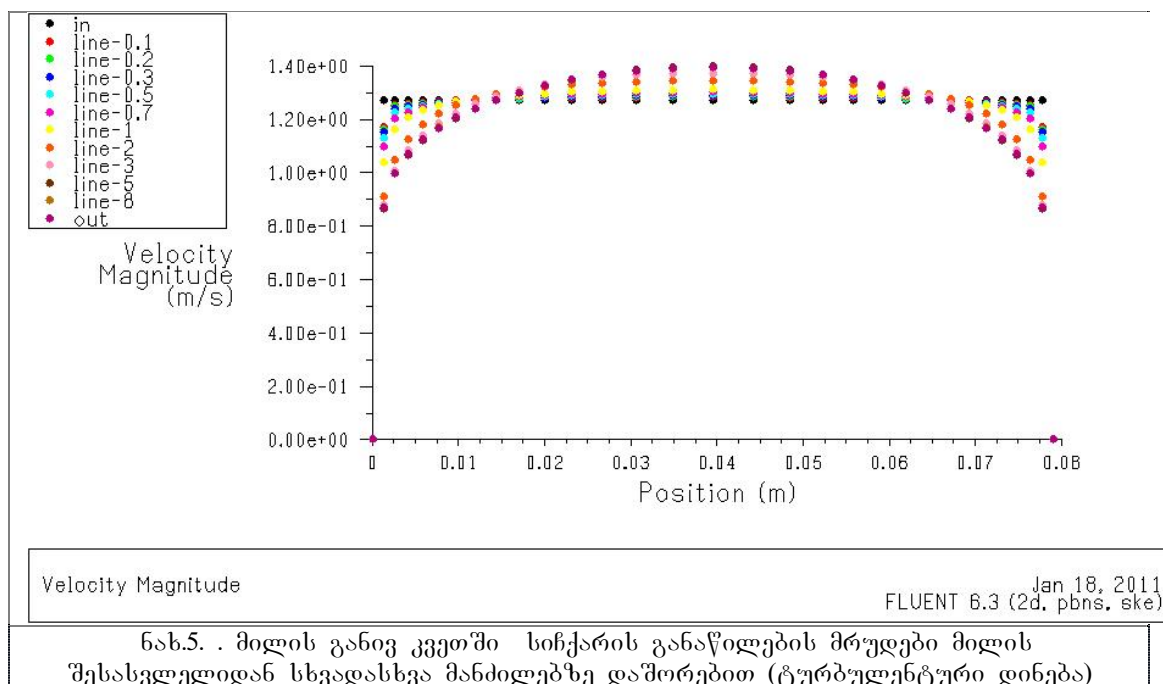
ტურბულენტური მოძრაობის დროს განივ კვეთში სიჩქარის ცვლილების მრუდს აქვს წაკვეთილი პარაბოლის სახე. კედელთან ახლოს მრუდი ძალიან ციცაბოა, ხოლო განიკვეთის შუა ნაწილში, სადაც ნაკადის ეგერეთწოდებული ტურბულენტური გულია მოთავსებული იგი ოდნავ დამრეცია. საშუალო სიჩქარის ( $\bar{w}$ ) შეფარდება მაქსიმალურ სიჩქარესთან ( $w_0$ ) არის  $Re$ -ის ფუნქცია:  $\bar{w} / w_0 = f(Re)$ . ტურბულენტური რეჟიმის დროს  $x \approx 40d$ .

მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმის დროს მილსადენის კედელთან ყოველთვის არის ისეთი შრე (ლამინარული სასაზღვრო შრე), რომელშიც სითხე მოძრაობს ლამინარულად. სტაბილიზაციის უბანზე ამ შრის სისქე თანდათან იზრდება ნულიდან მის ძერულ მნიშვნელობამდე.

მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმის დროს სითხის ნაწილები მოძრაობენ რთული, დროში მუდამ ცვალებადი ტრაექტორიით და სითხეში მიმდინარეობს ნაწილაკების ინტენსიური შერევა.

ლამინარულ და ტურბულენტურ მოძრაობებს შორის თვისობრივი განსხვავება იწვევს რაოდენობრივ განსხვავებასაც. კერძოდ განსხვავებულია მილსადენის კვეთში სიჩარეთა განაწილების კანონზომიერებები.

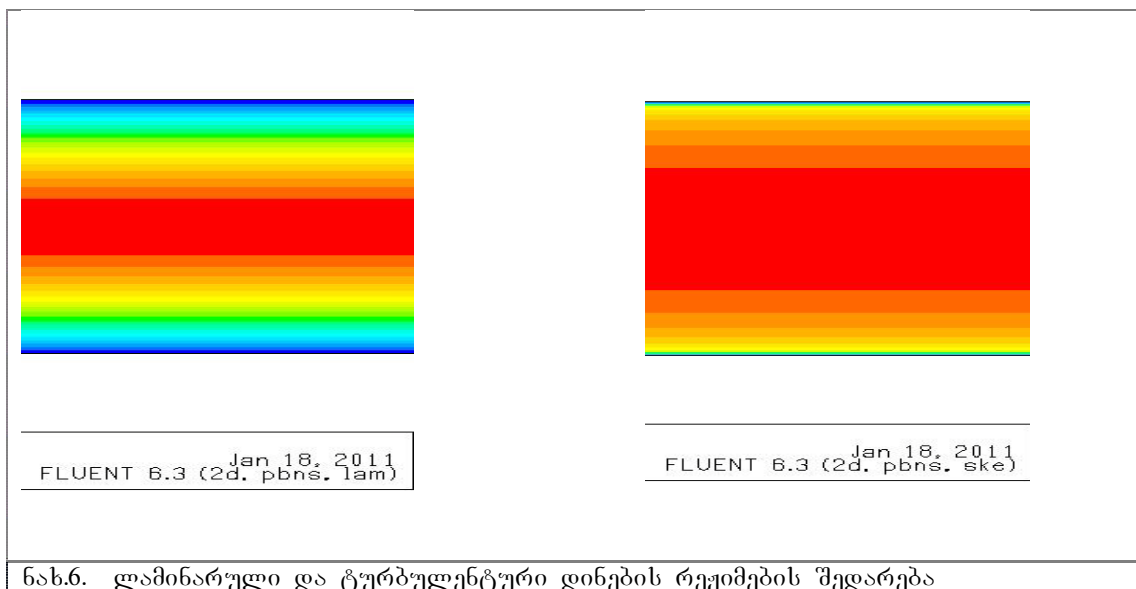
სიჩქარის მატებასთან ერთად სითხის ცალკეული ნაწილები მოძრაობენ სხვადასხვა მიმართულებით, ეჯახებიან ერთმანეთს, ეჯახებიან კედლებს და ა.შ. მოძრაობის რეჟიმი ხდება ტურბულენტური. ტურბულენტური მოძრაობის ხასიათი ძირითადად აიხსნება მოძრაობის ძირითადი მიმართულების მიმართ სიჩქარის განივი მდგენელის არსებობით.



ნახ.5-ზე მოცემულია ნაკადის ტურბულენტური რეჟიმის დროს მილსადენის განივ კვეთში სიჩქარეთა განაწილების მრუდები

მილსადენის შესასვლელიდან სხვადასხვა მანძილით დაშორებულ კვეთში. საბოლოოდ სტაბილურ უბანზე განაწილების მრუდს აქვს წაკვეთილი პარაბოლის სახე. საშუალო სიჩქარე ტოლია 1.27მ/წმ.

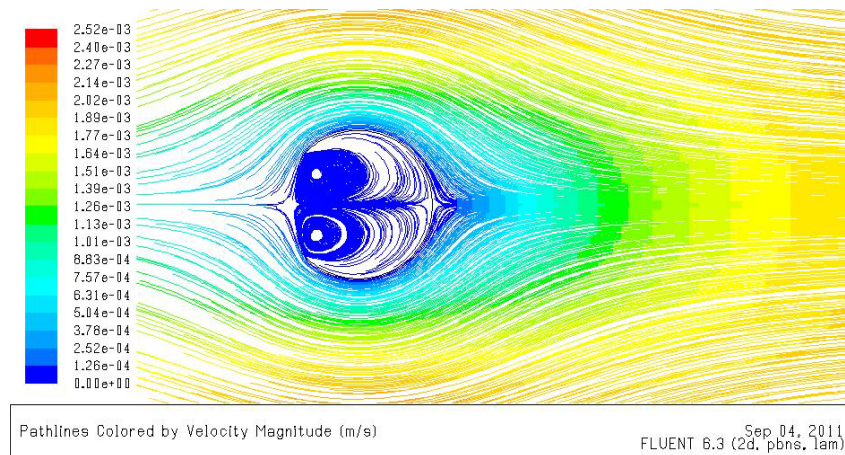
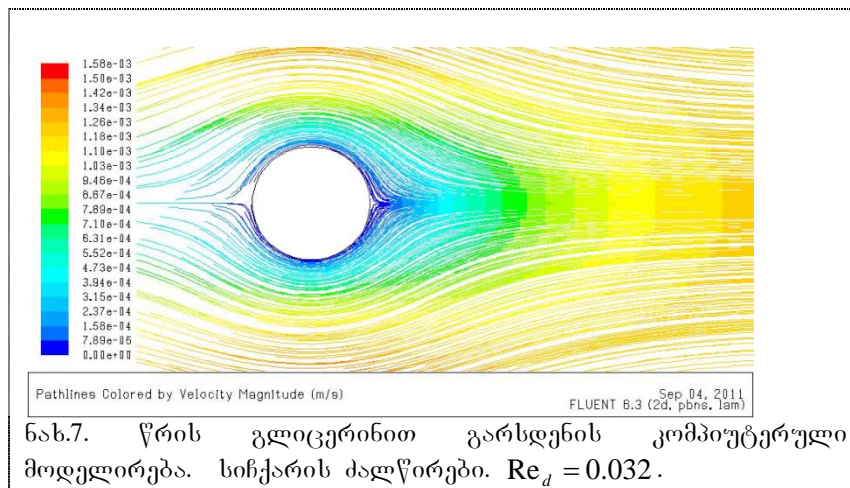
ნახ.6-ზე ნაჩვენებია სითხის დინების ლამინარული და ტურბულენტური რეჟიმების შედარებითი სურათი.



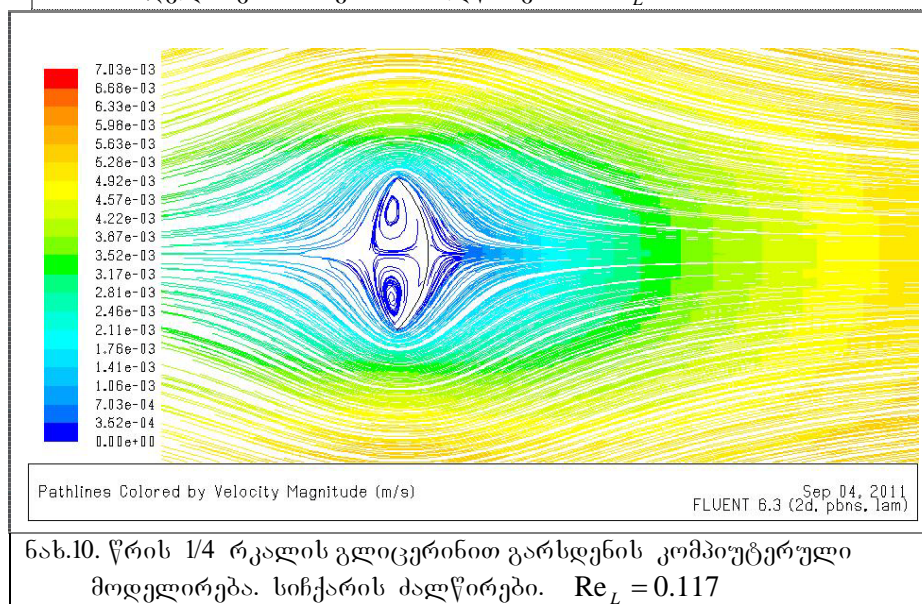
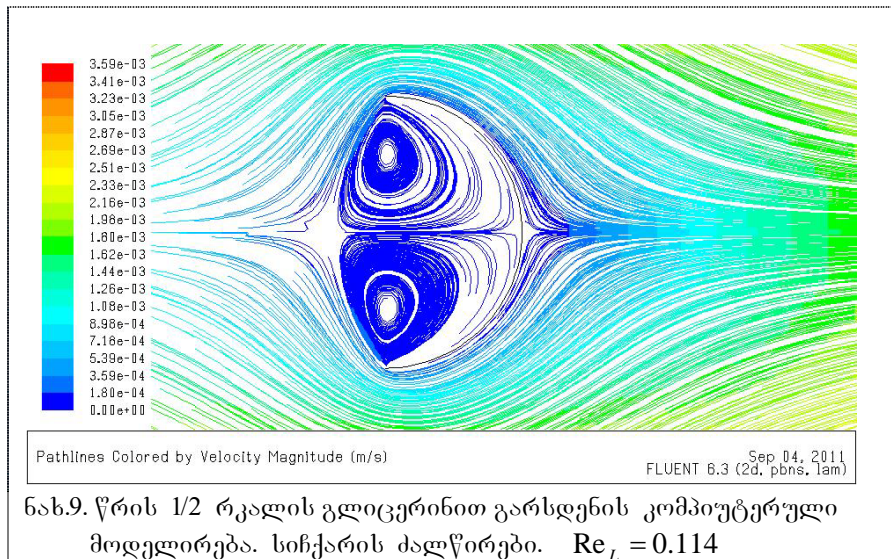
ნახ.6. ლამინარული და ტურბულენტური დინების რეჟიმების შედარება

## 2. სითხეში ჩაძირული სხვადასხვა ფორმის ფიგურების: წრე და წრის რკალების გარსდენა

გარკვეული თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს სითხეში ჩაძირული სხვადასხვა ფორმის ფიგურების გარსდენის პროცესების შესწავლას. ანგარიშები ჩატარებულია მცოცავი რეჟიმით წრის, წრის 3/4, 1/2 და 1/4 რკალების გლიცერინით გარსდენის დროს, პირობებისათვის:  $\rho=1266.5$  კგ/მ<sup>3</sup>;  $\mu=0.799$ პა.წმ და  $\nu=6.31 \cdot 10^{-4}$  მ<sup>2</sup>/წმ. ნახ.7-10 ნაჩვენებია წრის, წრის 3/4, 1/2 და 1/4 რკალების გლიცერინით გარსდენის სურათები. წრის დიამეტრია 20მმ, ნაკადის სიჩქარეა 1მმ/წმ და რეინოლდსის რიცხვები:  $Re_d=0.0317$  და  $Re_L=0.0995$ . ნაკადის გადაადგილება ხდება სითხის ცალკეული მოცულობების ბრუნვის (დაგრიგალების) გარეშე. დინების სურათი სიმეტრიულია. ნახ. ნახ.44- ნაჩვენებია 20 მმ დიამეტრის წრის 3/4 რკალის გარსდენა. ნაკადის სიჩქარეა 1.6 მმ/წმ და რეინოლდსის რიცხვი-  $Re_L=0.119$ .







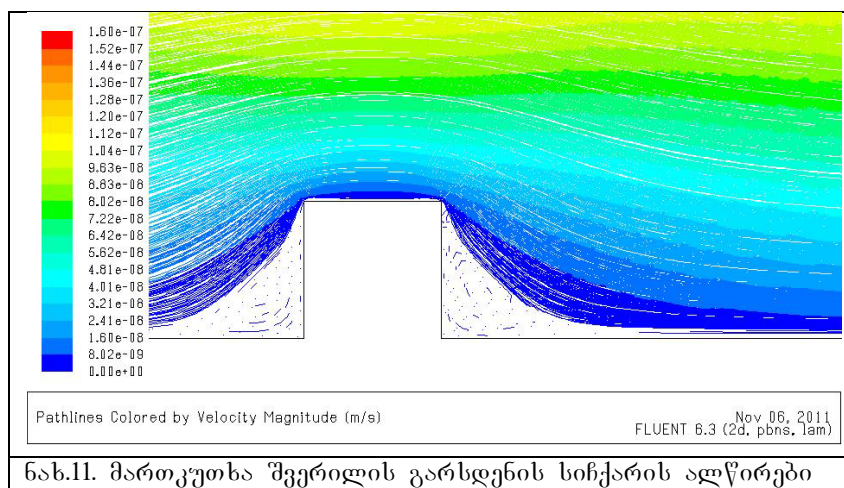
ნაკადის რევერსის შემთხვევებში პრაქტიკულად გარსდენის სურათები სიმეტრიულია.

რკალების შიდა ნაწილში, როგორც მოსალოდნელი იყო, აღინიშნება ერთი წყვილი გრიგალი, ცენტრებს შორის გარკვეული მანძილებით. ლიტერატურაში მოცემული ნახევარწრის ალუმინის ფხვნილით დისპერგირებული გლიცერინით გარსდენის ( $Re_d = 0.031$ ) წყვილ გრიგალებს შორის ექსპერიმენტულად განსაზღვრული მანძილი ტოლია  $0.52d$ . ამ უკანასკნელის გადახრა კომპიუტერული მოდელირებით მიღებულ სიდიდისაგან შეადგენს 9%, რაც

შესაძლებელია დაკავშირებულია გლიცერის თბოფიზიკური მახასიათებლების და რეინოლდსის რიცხვების განსხვავებებთან.

### 3. შვერილის გარსდენა.

ნახ. 11. ნაჩვენებია სიბრტყეზე მართკუთხა ფორმის შვერილის გარსდენის სიჩქარის ძალწირების სურათი.



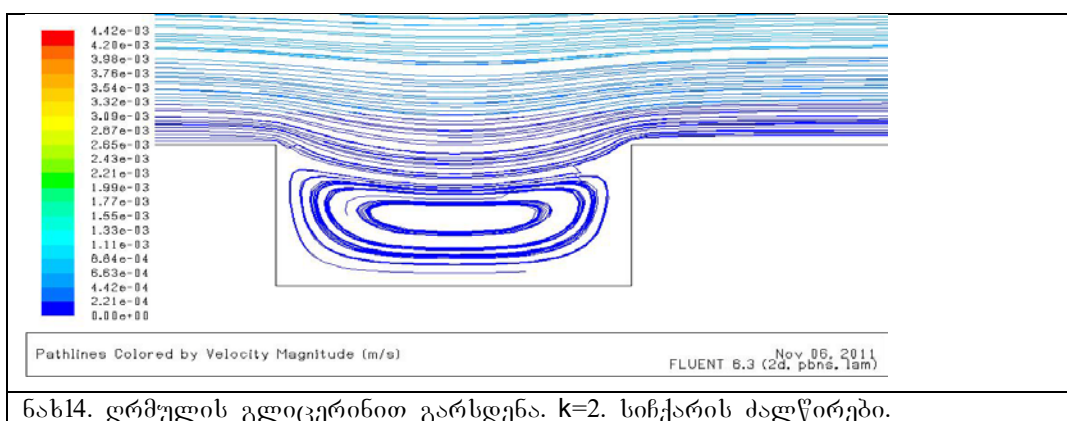
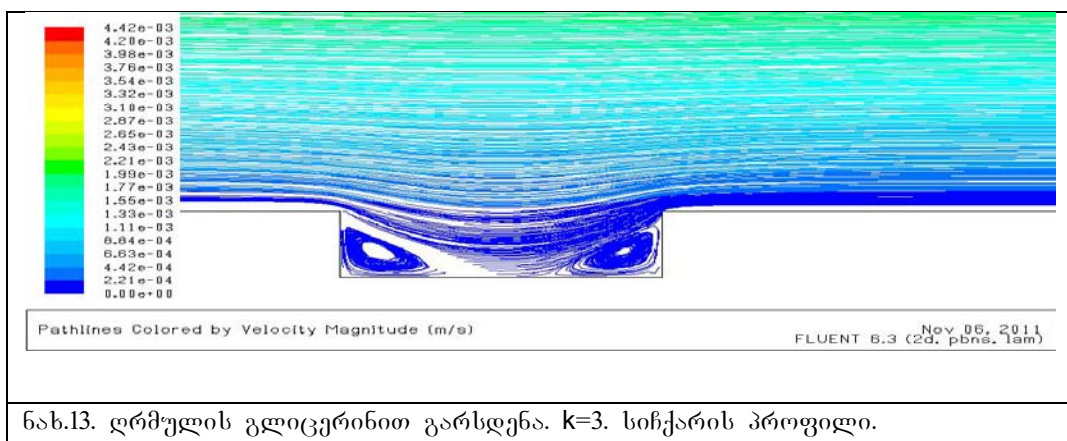
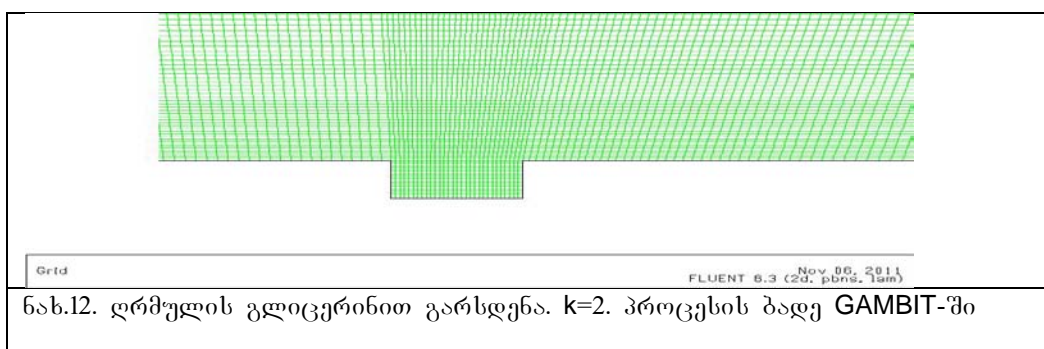
ნახ.11. მართკუთხა შვერილის გარსდენის სიჩქარის ალწირები

### 4. ღრმულის გარსდენა

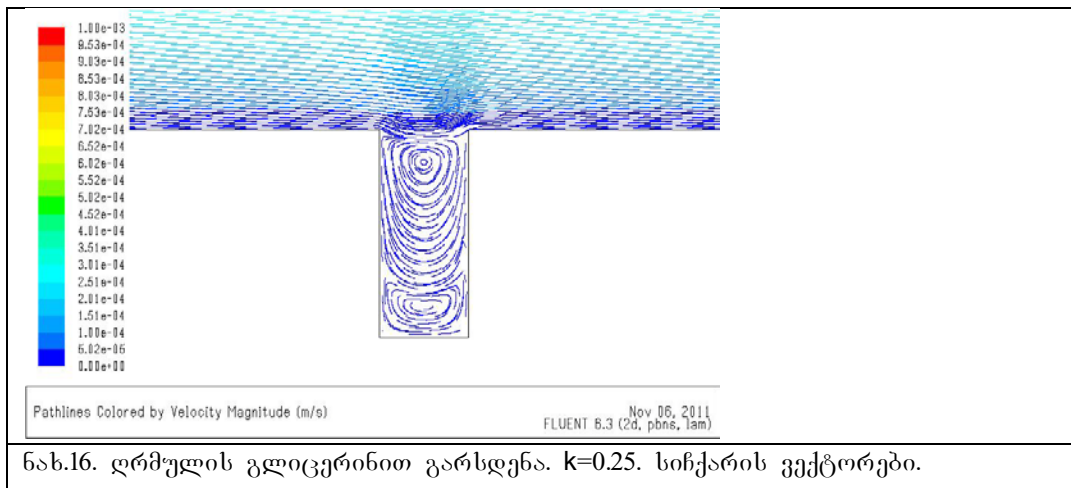
კვლევის ობიექტს წარმოადგენს სიბრტყეზე სხვადასხვა ზომის მართკუთხა ღრმულები, რომელთა გარსდენა ხორციელდება გლიცერინის ნაკადის ძალიან მცირე სიჩქარეების პირობებში (მცოცავი რეჟიმი) - რეინოლდსის რიცხვი გამოთვლილი ღრმულის სიღრმის მიხედვით ტოლია 0.01. ღრმულების მახასიათებელ პარამეტრად აღებულია  $k=b/h$ , ღრმულის სიგანის-  $b$  მის სიღრმესთან-  $h$  შეფარდება.

ნახ.12-ზე ნაჩვენებია ნაკადის დინების სურათის შესასწავლად პროგრამა GAMBIT-ში გენერირებული ბადე სიბრტყეზე ღრმულის (8\*4მმ) გარსდენის შემთხვევაში, როცა  $k=2$ . ბადე ხშირია იმ ნაწილში, (ღრმულის უბანი), სადაც მეტი ინფორმაციის მიღებაა საჭირო. ანალოგიური ბადეები იგება სხვა ზომის ღრმულებისთვისაც. შემდეგ ხდება ნახაზის გადატანა პროგრამა FLUENT-ში, ნაკადის საწყისი მონაცემების შეტანა (სიჩქარე, ტემპერატურა, წნევა, სიმკვრივე, დინების სახე და სხვ.), გამოთვლების ჩატარება და შედეგების გამოტანა. ნახ.13-16 -ზე ნაჩვენებია შემთხვევები  $k=3;2;1$  და 0.25 შესაბამისად.

პროცესების ანალიზმა აჩვენა, რომ  $k$  სიდიდის შემცირებისას ღრმულში ორ გრიგალურ ზონას ცვლის ერთი განიერი გაწელილი გრიგალი, ხოლო შემდეგ ერთი კონცენტრირებული გრიგალი და ბოლოს ღრმა ღრმულში ჩნდება ერთმანეთის ქვეშ თანმიმდევრული გრიგალების დიდი რაოდენობა.

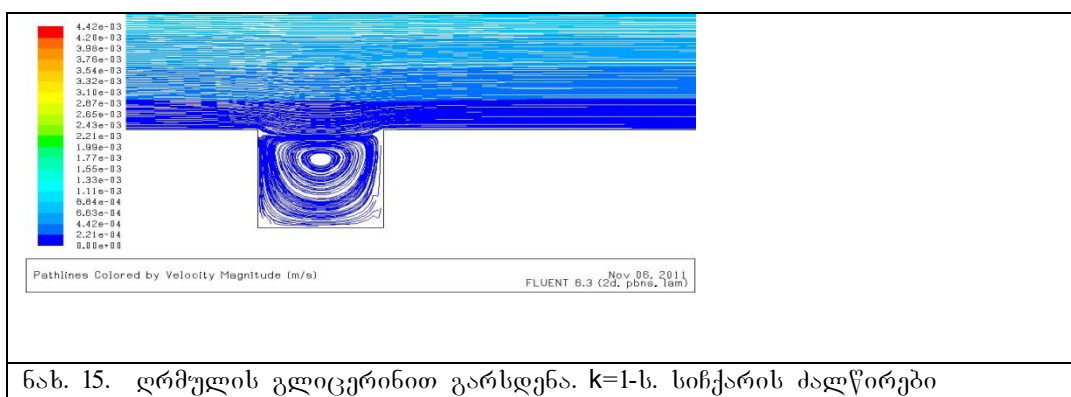
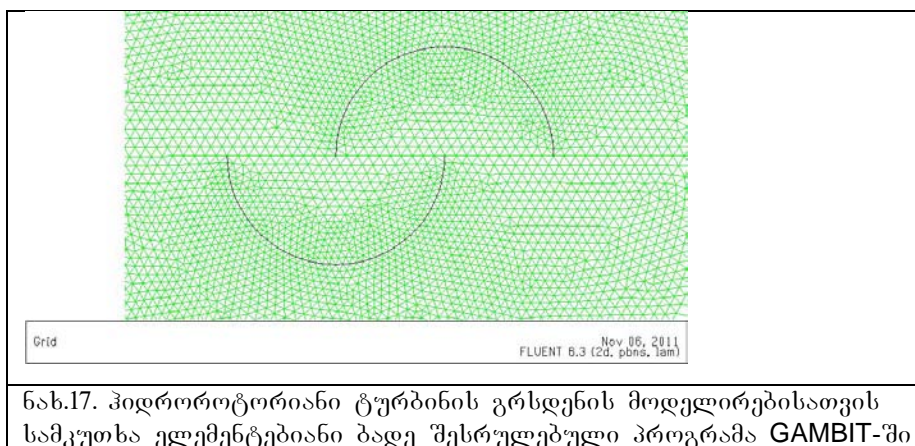




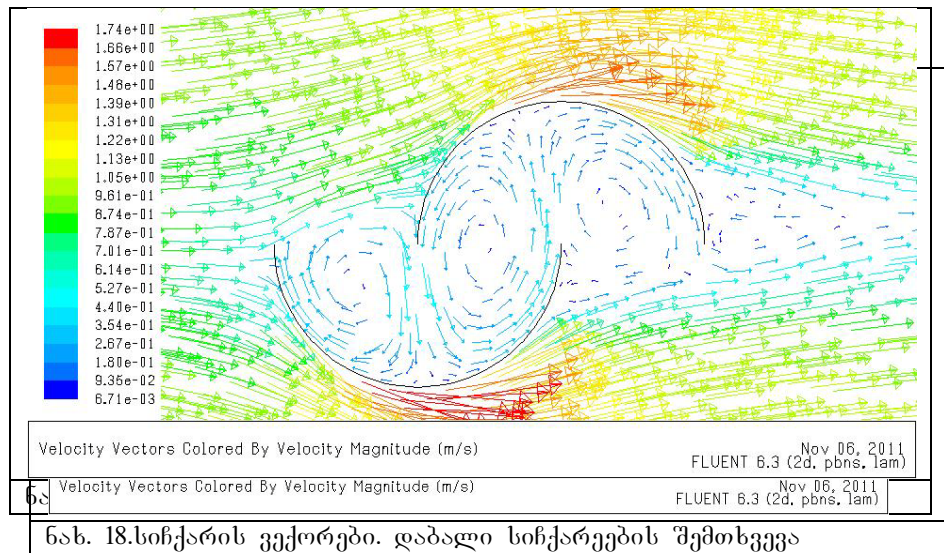


## 5. ჰიდროტურბინის სადენი ნაწილი

ნახ.17-ზე ნაჩვენებია კაჩინსკის ჰიდროროტორიანი ტურბინის სადენი ნაწილის გარსდენის ილუსტრაციისათვის სამკუთხა ბადის სურათი აგებული პროგრამა GAMBIT-ში.



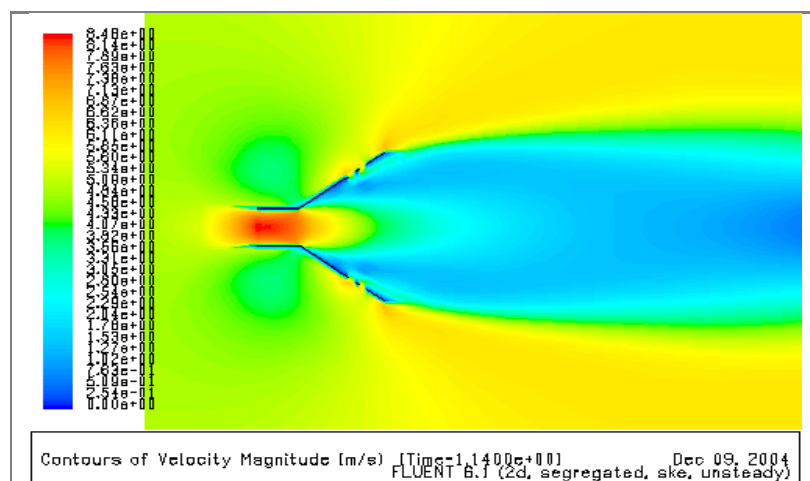




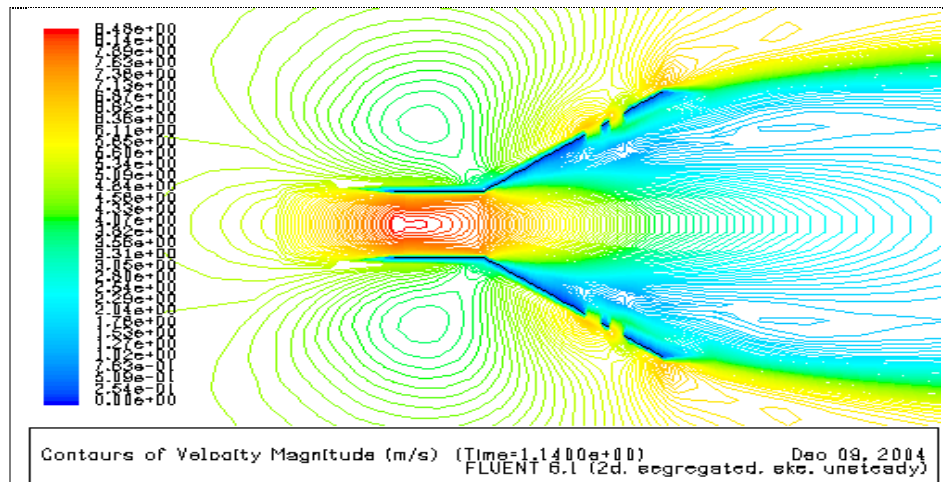
ნახ.18 ნაჩვენებია სიჩქარის ვექტორები დაბალი სიჩქარეების დროს, ხოლო 19-ზე - სიჩქარის ვექტორები მაღალი სიჩქარეების დროს. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში აღვილი აქვს გრიგალური კერების წარმოშობას. რაც იწვევს წნევის დანაკარგებს.

## 6. არხში სიჩქარის გაზრდა პერფორირებული დიფუზორის გამოყენებით

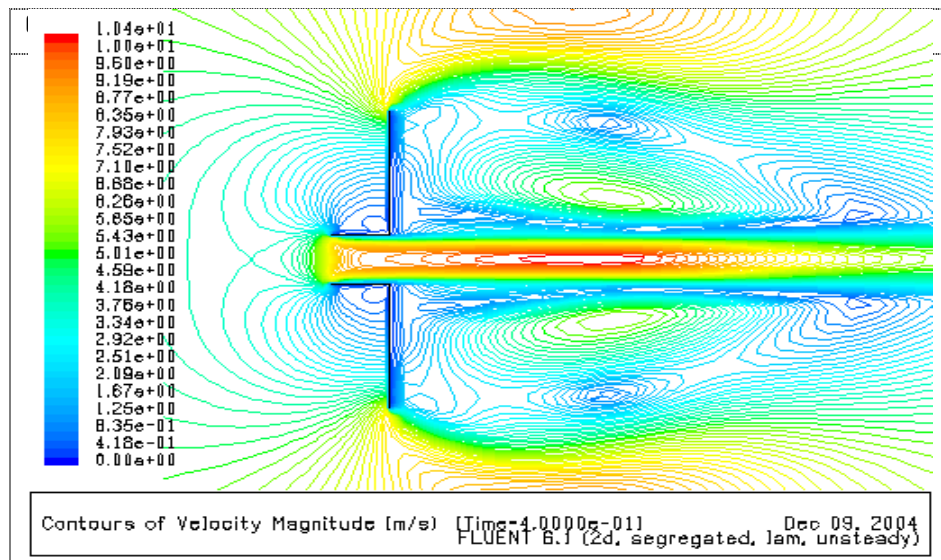
ნახ. 20 და 21 -ზე ნაჩვენებია არხში სიჩქარის გაზრდის მაგალითი პერფორირებული დიფუზორის გამოყენებით.



ნახ. 20. სიჩქარის განაწილების სურათი



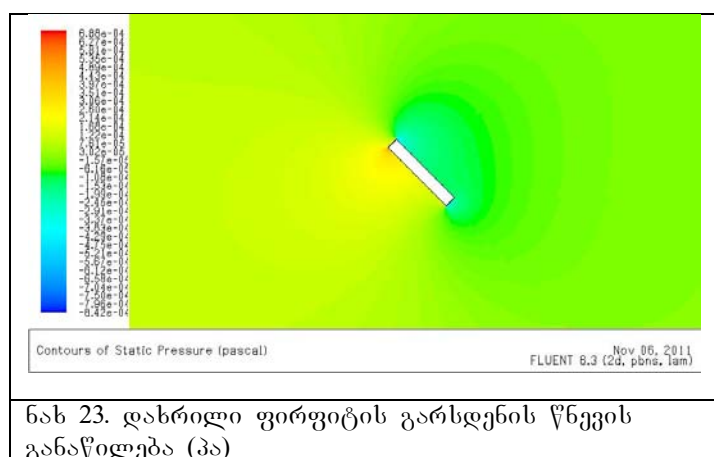
ნახ.21. არხის ცილინდრულ ნაწილში სიჩქარის გაზრდა პერფორირებული დიფუზორით. სიჩქარის ძალწირები

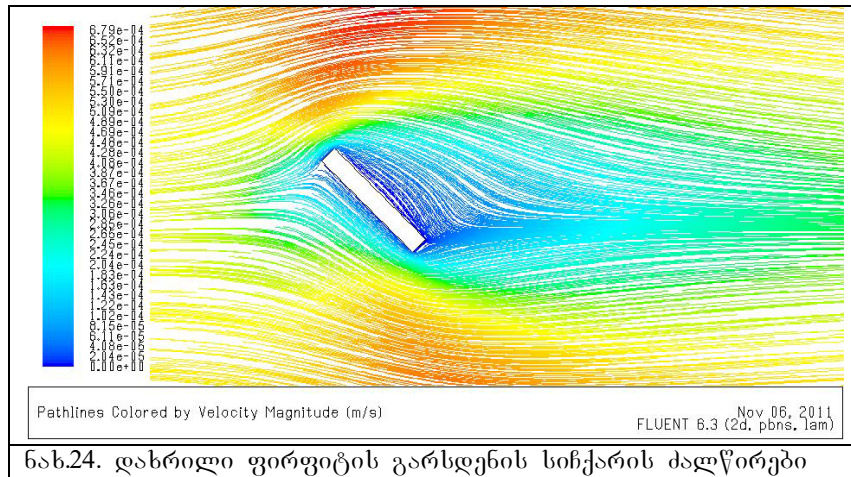


ნახ. 22. ნახვენებია სიჩქარის ძალწირების სურათი როცა დიფუზორის გაშლის კუთხე 90 გრადისია.

#### 7. დახრილი ფირფიტის გარსდენა

პრაქტიკაში გვხვდება შემთხვევები, როცა ადჰგილი აქვს სხვადასხვა ორიენტაციის მქონე ფირფიტის გარსდენას. პროცესის მიმდინარეობის შესასწავლად ჩატარებულია ფირფიტის გარსდენის მოდელირება. ნახაზებზე 23 და 24 ნახვენებია წნევის განაწილება, და სიჩქარის ძალწირები.





ნახ.24. დახრილი ფირფიტის გარსდენის სიჩქარის ძალწირები

**თავი III.** მოცემულია პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტა პროგრამული პაკეტების გამოყენებით.

1. *xarjis sazomdi afraSi nakadis modelireba dastandar-tuli moTxovnebi dan gdxris (SenWdroebis sadebis arasw rad montaji) gamkvl eva sistematური xasiaTis cdomil ebaZe Sesworebis Setanis mizniT.*

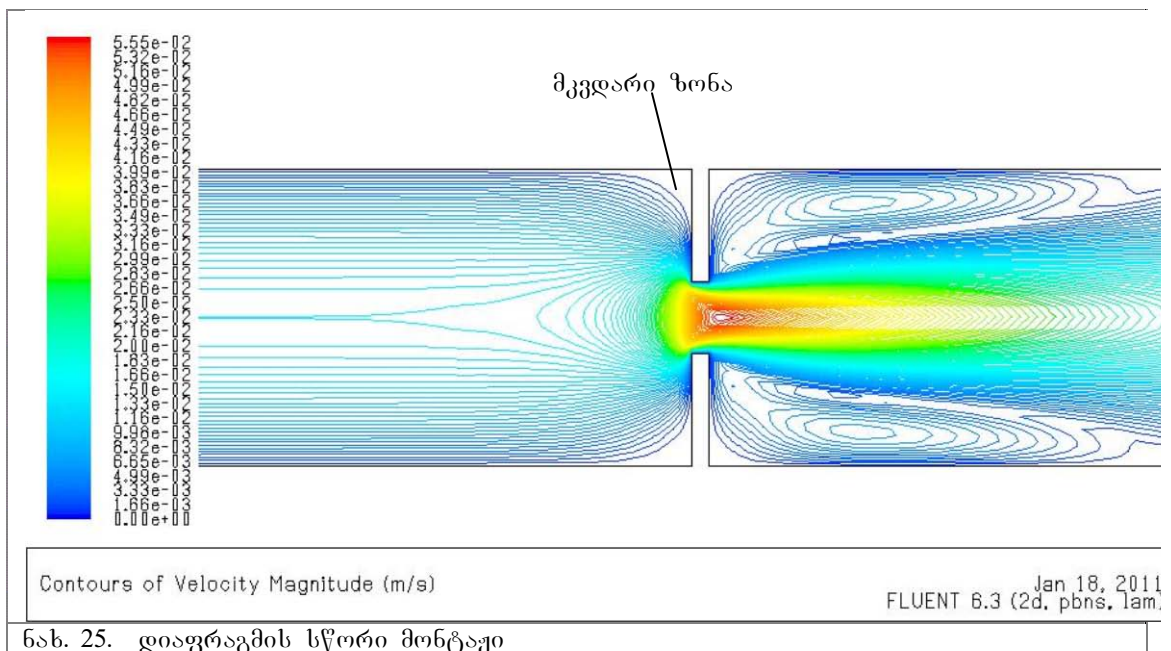
ენერგეტიკულ ობიექტებზე თბოშემცველების მაღალი ხარჯების გასაზომად ფართოდ გამოიყენება ვიწროვადი მოწყობილობებიანი ხარჯსაზომები (უმეტესად დიაფრაგმული). დიაფრაგმა დგება მილსადენში და ქმნის მასში ადგილობრივ შევიწროებას-წინააღმდეგობას, ნაკადის გავლისას იზრდება ნაკადის სიჩქარე შევიწროებულ კვეთში, იქმნება წნეგათა სხვაობა, რომელიც დამოკიდებულია ნაკადის სიჩქარეზე და ესე იგი ნაკადის ხარჯზე.

არც თუ ისე იშვიათია შემთხვევები, როცა ხარჯსაზომი ვერ აკმაყოფილებს სტანდარტებით გათვალისწინებულ მოთხოვნებს. მაგალითად დიაფრაგმის საზომი კამერის შემჭიდროების სადების ჩამოცილება- შევრილის სახით მილსადენის შიგა ზედაპირზე. რადგან რთულია რგოლური სადების ისეთი დიამეტრის შერჩევა, რომელიც ადგილზე დაყენების და ქანებით მოჭერის შემდეგ დადგება მილსადენის შიგა ზედაპირის გასწვრივ.

მილსადენებისა და საზომი კვანძის არაორდინალურ პირობებში მუშაობისას გაზომვის შედეგების დასაზუსტებლად აუცილებელი ხდება

სისტემატური ცდომილებების წყაროების გამოვლენა და გაზომვის შედეგებში შესაბამისი შესწორებების გათვალისწინება.

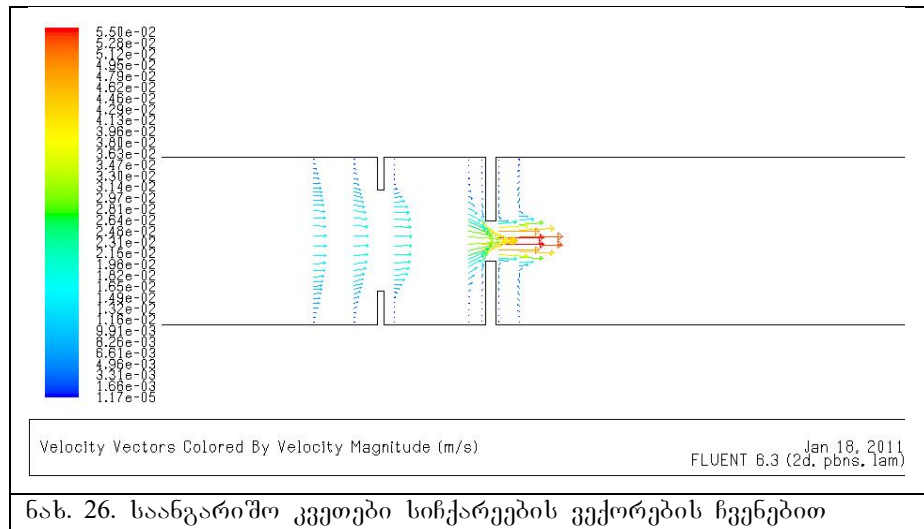
ნახ. 25-ზე ნაჩვენებია დიაფრაგმაში ნაკადის მოდელირებით მიღებული სიჩქარის ძალწირების სურათი დათვლილი FLUENT-ში, როცა დაცულია სტანდარტებით მოთხოვნილი პირობები. დიაფრაგმაში ნაკადის გაღინების დროს მის კუთხეებში იქმნება მკედარი ზონა, რომელშიც წნევათა სხვაობის გამო წარმოიშობა სითხის უკუ მიმართულებით დინება (მეორადი ნაკადი). სითხის სიბლანტის გამო ძი-



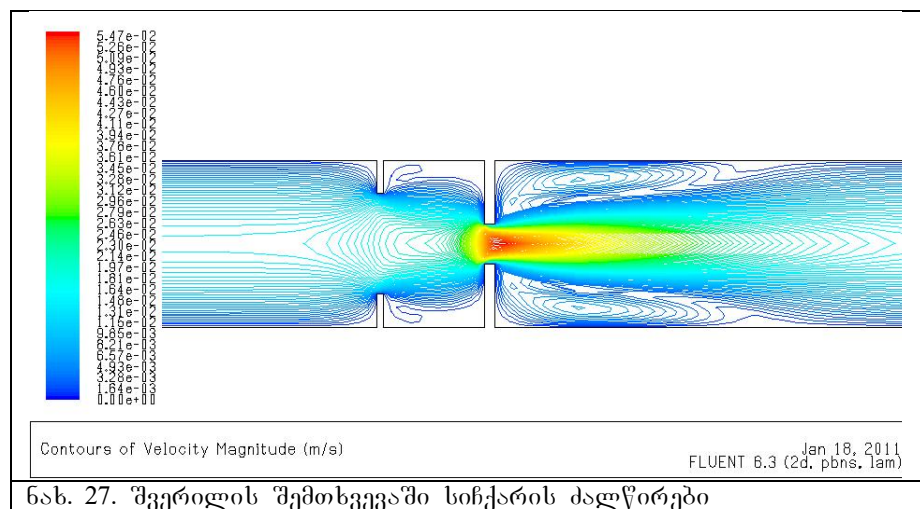
რითადი და მეორადი ნაკადის ჭავლები, რომლებიც მოძრაობენ ერთმანეთის საპირისპირო მიმართულებით, ხდება ნაკადის შედეგება გრიგალების სახით. დიაფრაგმის შემდეგ გრიგალწარმოქმნაზე იხარჯება წნევათა მნიშვნელოვანი სხვაობა.

ნახ. 26, 27 და 28 –ზე ნაჩვენებია კვეთები, რომელშიც ხდება სიჩქარეების ძალწირების გამოთვლა, სიჩქარის ძალწირები და მონიშნულ კვეთებში სიჩქარის გრაფიკები შესაბამისად, დიაფრაგმის შემჭიდროების სადების ჩამოცილების შემთხვევაში, შვერილის სახით მილსადენის შიგა ზედაპირზე.

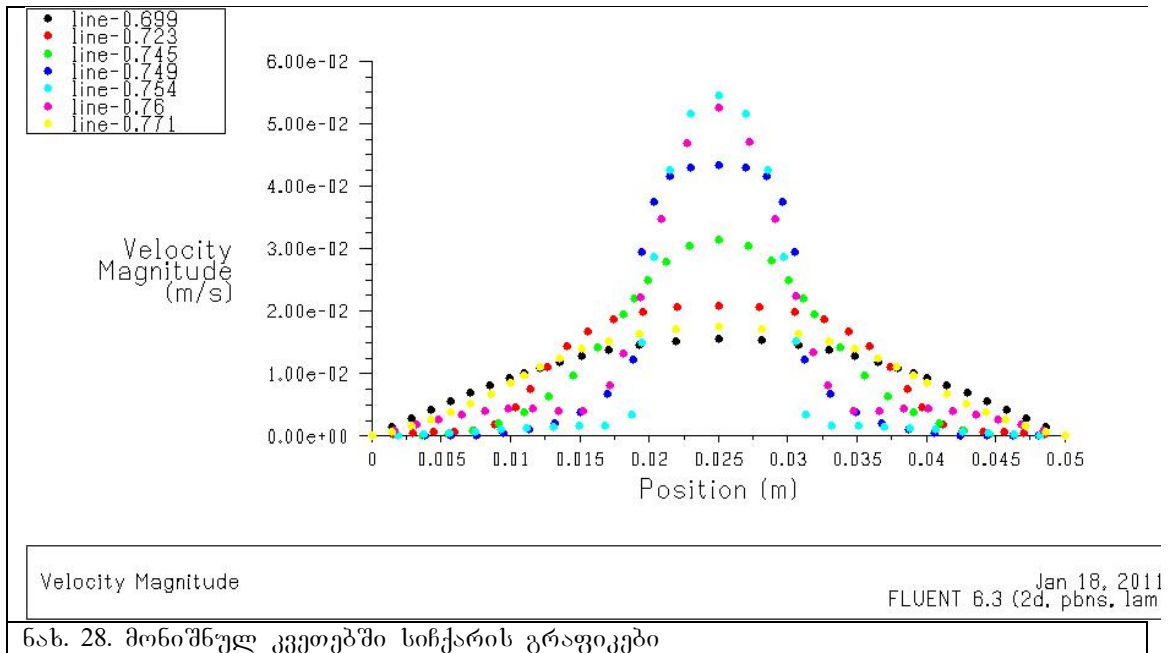




შვერილის შედეგად მახინჯდება საანგარიშო წნევათა სხვაობა.



როგორც ჩანს, არასწორად შესრულებული შემჭიდროების სადებით შექმნილი შვერილი დამატებით წინააღობას ქმნის ნაკადისათვის, იწვევს წნევათა სხვაობის ცვლილებას და საანგარიშო წნევათა სხვაობის დამახინჯებას. შედეგად გაზომილი ნივთიერებათა ხარჯი, რომელიც არის წნევათა სხვაობის ფუნქცია შეიცავს სისტემატიური ხასიათის ცდომილებას.



ნახ. 28. მონიშნულ კვეთებში სიჩქარის გრაფიკები

ხარჯის კოეფიციენტი ისაზღვრება ექსპერიმენტულად. რეინოლდსის რიცხვის გარკვეული ზღვრული სიდიდის შემდეგ ხარჯის კოეფიციენტი პრაქტიკულად მუდმივი სიდიდეა და დამოკიდებულია მხოლოდ დიაფრაგმის მოდულზე. ცხრილის მონაცემების აპროქსიმაციით მიღებული რეინოლდსის ზღვრული სიდიდე ტოლია:

$$Re_{ზღვრ} = -888889 \cdot m^3 + 971429 \cdot m^2 + 27937 \cdot m + 19000 \quad (R^2=0.9997)$$

ხარჯის კოეფიციენტის შესახებ დასკვნები სამართლიანია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა დაცული იქნება სატნდარტებით მოთხოვნილი დიაფრაგმის დამზადების, მონტაჟისა და ექსპლუატაციის პირობები. მონტაჟის ერთ-ერთი ასეთი პირობაა, რომ მილსადენის შიგა ზედაპირი უნდა იყოს გლუვი, რაც არასწორი მონტაჟის შემთხვევაში (სადებით შევრილის წარმოშობა) არ სრულდება.

დიაფრაგმის წინ შევრილის გავლენის შესასწავლად ნაშრომში განხილულია შემდეგი მაგალითი. გლუვ მილში მოძრაობს  $70^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურის მქონე წყალი ხარჯით  $27\text{მ}^3/\text{წმ}$ . მილში შესვლაზე სითხის წნევა კვეთში თანაბარია და ტოლია 5 ატა. მილის შიგა დიამეტრია 150 მმ, ხოლო დიაფრაგმის ნახევრეტის დიამეტრი -80მმ. დიაფრაგმის მოდული  $m=80^2/150^2=0.284$ . ხარჯის კოეფიციენტი ტოლია 0.631. ამ შემთხვევისათვის რეინოლდსის ზღვრული სიდიდე ფორმულით გაანგარიშებით ტოლია:  $Re_{ზღვრ} = 84711$ . რადგან რეინოლდსის პრაქტი-

კული სიდიდე მეტია მის ზღვრულ სიდიდეზე ამიტომ ხარჯის კოეფიციენტი არ იქნება დამოკიდებული რეინოლდსის რიცხვზე.

პროცესის მოდელირებით მიღებულია, რომ გლუვი მილის შემთხვევაში წნევის ვარდნამ დიაფრაგმაზე შეადგინა 299 მმ.Hg., შვერილის შემთხვევაში ორ კვეთში: ნაკადის შეშფოთებამდე და ნაკადის მინიმალურ კვეთში წნევის ვარდნა გაიზარდა შვერილის წინაღობით და შესწორება შვერილზე  $K_{\text{შვ}}=1.02$ . შესაბამისად ხარჯის კოეფიციენტი ტოლი გახდა 0.644 და ხარჯი კი - 27.54მ<sup>3</sup>/წმ.

ამრიგად, კომპიუტერული მოდელირების საშუალებით შესაძლებელი ხდება სისტემატიური ხასიათის ცდომილებების აღმოჩენა და შესაბამისი შესწორებების შეტანით შედეგების დაზუსტება.

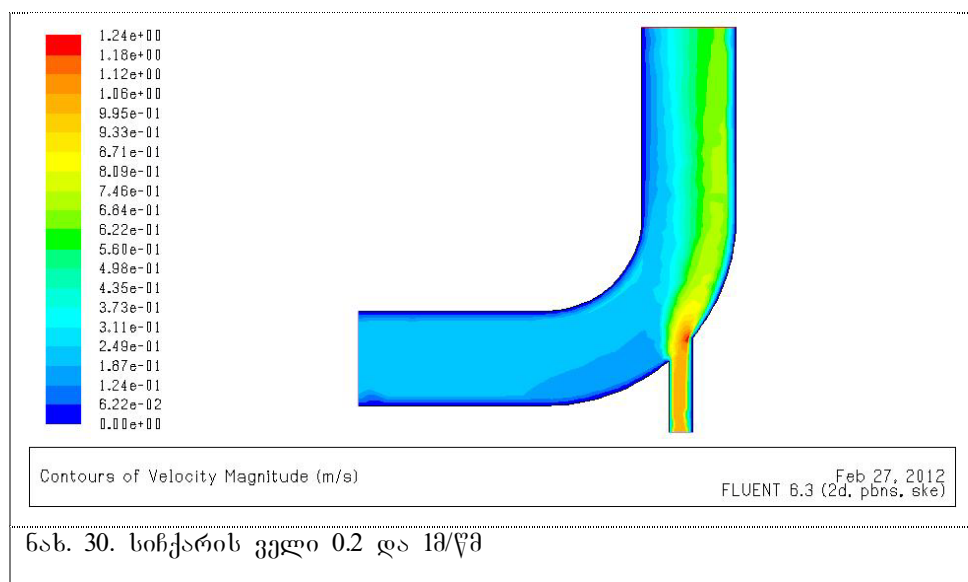
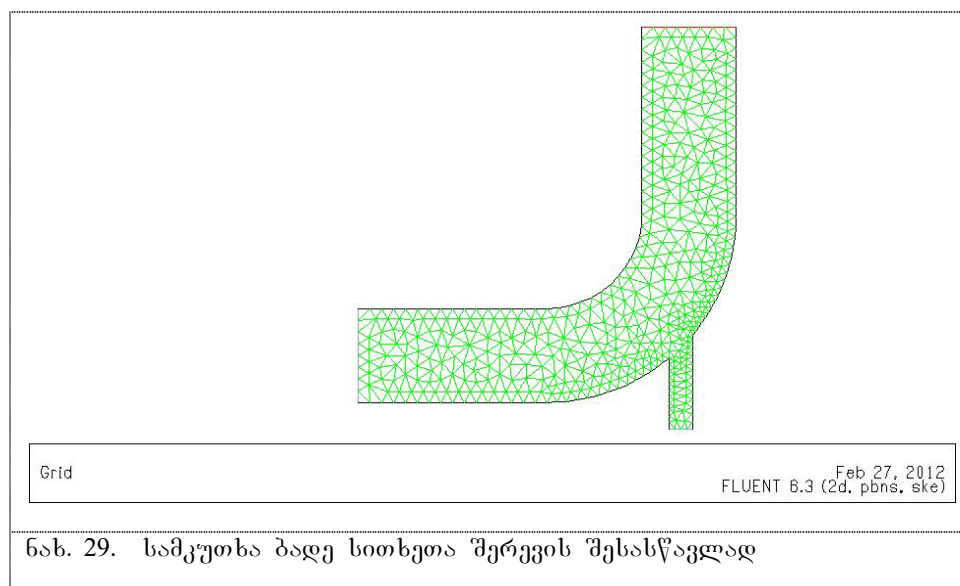
## 2. სხვადასხვა ტემპერატურის მქონე სითხის ნაკადების ტურბულენტური შერევის გამოკვლევა მათ შორის თბოცვლის გათვალისწინებით.

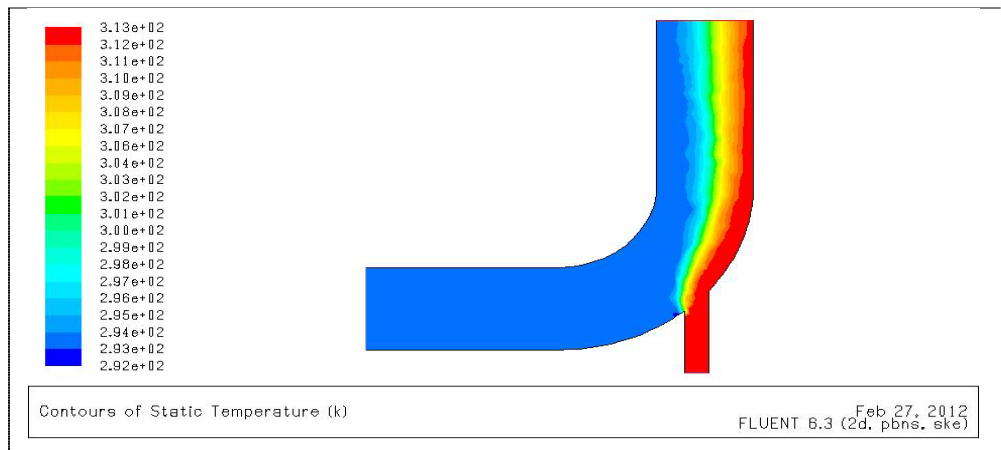
წარმოების მრავალ დარგში ხშირია სხვადასხვა ტემპერატურის მქონე სითხის ნაკადების შერევის შემთხვევები. სისტემის სწორი პროექტირებისათვის მნიშვნელოვანი ხდება ნივთიერების ხარჯისა და ტემპერატურის პროგნოზი შერევის არეში. პროგრამული პაკეტები FLUENT და GAMBIT ამ პროცესის მოდელირების საშუალებას იძლევა.

ცივი სითხე (წყალი, თბომტარი 1) ტემპერატურით 20°C შედის 400მმ დიამეტრის მქონე მილში და შეერევა თბილ წყალს (თბომტარი 2 ტემპერატურა 40°C), რომელიც მიეწოდება მუხლში მხებად 100მმ დიამეტრის მქონე მილით. მილში შესასვლელზე პირველი თბომტარის სიჩქარე  $V_1 = 0.2\text{მ/წმ}$  და არ იცვლება, ხოლო მეორე თბომტარის სიჩქარე  $V_2$  იცვლება დიაპაზონში 1მ/წმ –დან 100 მ/წმ-დე. წყლის თბოფიზიკური პარამეტრებია: სიმკვრივე-  $\rho = 1000\text{კგ/მ}^3$ , თბოგამტარობის კოეფიციენტი-  $\lambda = 0.068\text{ვტ/(მK)}$ , დინამიკური სიბლანტე-  $\mu = 8 \cdot 10^{-4}\text{პა} \cdot \text{წმ}$ , მუდმივი წნევის დროს მასური სითბოტევადობა  $C_p = 4.216\text{კჯ/(კგ} \cdot \text{K)}$ . რეინოლდსის რიცხვი პირველ მილში შესვლაზე ტოლია  $Re = V_1 d_1 \rho / \mu = 1 \cdot 10^5$ , ანალოგიურად  $Re = V_2 d_2 \rho / \mu$  მეორე მილში იცვლება დიაპაზონში -  $Re = (1.25 \cdot 10^{-5} - 1.25 \cdot 10^7)$ .

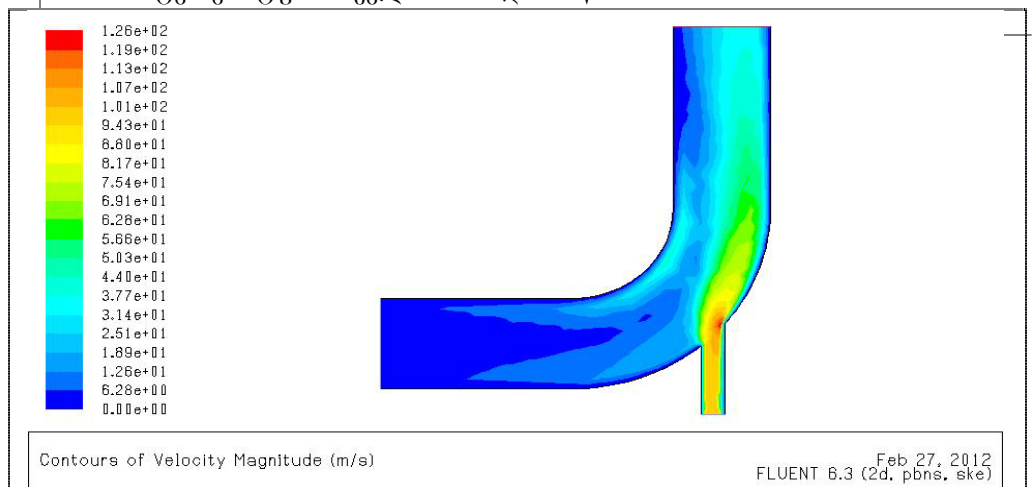


წყლის ნაკადების შერევის პროცესის მოდელირებისათვის შექმნილი ბადე (1215 სამკუთხედით) ნაჩვენებია ნახ. 29-ზე. ანგარიში ტარდება სტანდარტული ტურბულენტური მოდელისათვის. პროგრამაში გააქტიურებულია ცალკეულ სამკუთხედებს შორის მომქმედი თბოცვლის შესაბამისი ენერგიების განტოლებები. ნახ. 30 და 32 –ზე ნაჩვენებია შესაბამისად სიჩქარის ველები 0.2 და 1 მ/წმ და 0.2 და 100 მ/წმ სიჩქარეების დროს. ანალოგიურად იგივეა გამოსახული, ნახაზებზე 31 და 33 მხოლოდ ტემპერატურების ველებისათვის.

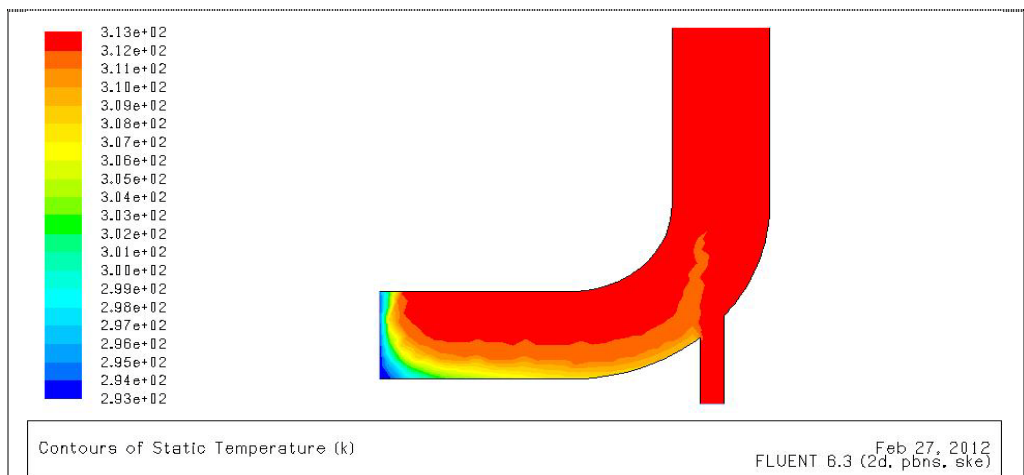




ნახ. 31. ტემპერატურის ველი 0.2 და 1მ/წმ



ნახ.32. სიჩქარის ველი 0.2 და 100მ/წმ



ნახ.33. ტემპერატურის ველი 0.2 და 100მ/წმ

შველ

ბ

განხილული შემთხვევისათვის გამოსასვლელ კვეთში პროგნოზით მიღებული სიჩქარეების და ტემპერატურების განაწილების მონაცემები მოყვანილია ცხრილებში 1 და 2.

ცხრ.1.

გამოსასვლელი კვეთი, ათვის წერტილი -1.22მ	სიჩქარე გამოსასვლელ კვეთში, მ/წმ			
	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ
	II ნაკადის სიჩქარე-1მ/წმ	II ნაკადის სიჩქარე-10მ/წმ	II ნაკადის სიჩქარე-50მ/წმ	II ნაკადის სიჩქარე-100მ/წმ
1,22	0	0	0	0
1,27	0,192953	1,05047	4,67254	8,59948
1,32	0,287715	1,60876	7,68834	15,8236
1,37	0,388856	2,27788	11,2583	23,7533
1,42	0,493456	2,99257	14,8231	30,822
1,47	0,574648	3,56686	17,3146	35,0777
1,52	0,619284	3,89105	18,4467	36,5798
1,58	0,643968	3,9133	17,4291	32,8128
1,63	0	0	0	0

ცხრ.2.

გამოსასვლელი კვეთი, ათვის წერტილი -1.22მ	ტემპერატურა გამოსასვლელ კვეთში, °C			
	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ	I ნაკადის სიჩქარე-0.2მ/წმ
	II ნაკადის სიჩქარე-1მ/წმ	II ნაკადის სიჩქარე-10მ/წმ	II ნაკადის სიჩქარე-50მ/წმ	II ნაკადის სიჩქარე-100მ/წმ
1,22	293,197	310,371	312,358	312,374
1,27	293,344	310,411	312,369	312,386
1,32	294,005	310,51	312,397	312,421
1,37	296,07	310,682	312,451	312,494
1,42	299,951	310,971	312,541	312,602
1,47	304,826	311,401	312,661	312,724
1,52	308,833	311,865	312,776	312,826
1,58	311,433	312,399	312,887	312,915
1,63	312,568	312,723	312,949	312,964

## ძირითადი დასკვნები

1. ლიტერატურული მიმოხილვის საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ თბო და ჰიდროენერგეტიკული სპეციალობის სტუდენტებისათვის კომპიუტერული პროგრამების პაკეტი FLUENT da GAMBIT წარმატებით შეიძლება გამოყენებული იქნას ვირტუალური ლაბორატორიული ამოცანების შექმნის მიზნით, ჰიდროაეროდინამიკური და თბური პროცესების შესწავლის პროცესში;
2. თბო და ჰიდროენერგეტიკის სპეციალობის სტუდენტებისათვის სასწავლო გეგმის მიხედვით შერჩეულია მაპროფილებელი საგნების შესაბამისი თემები და კონკრეტული საკითხები, სადაც მნიშვნელოვანია ჰიდროაეროდინამიკური და თბური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება;
3. კომპიუტერული პროგრამების FLUENT da GAMBIT პაკეტების გამოყენებით შეიქმნა ვირტუალური ლაბორატორიული ბაზა შემდეგი ამოცანებით:
  - სითხის დინების ლამინარული და ტურბულენტური რეჟიმები;
  - სითხეში ჩაძირული წრის და რკალების მცოცავი რეჟიმით გარსდენა;
  - შევრილის და დრმულების გარსდენა; ჰიდროტურბინის ნიჰების გარსდენა;
  - არხში სიჩქარის გაზრდის მოდელი;
  - დახრილი ფირფიტის გარსდენა;
  - ნივთიერებათა ხარჯის საზომი დიაფრაგმის მოდელი;
  - სხვადასხვა ტემპერატურის მქონე სითხის ნაკადების შერევის მოდელი.
4. დამუშავებულია მეთოდთა, პროგრამების FLUENT da GAMBIT გამოყენებით, ჰიდროაეროდინამიკური და თბოგადაცემის თეორიული და პრაქტიკული ამოცანების გადასწავლა;
5. ნაკადის მოდელირებით გამოკვლეულია ნივთიერებათა ხარჯის საზომ დიაფრაგმაში შემჭიდროების სადების არასწორი მონტაჟის

პირობებში მიმდინარე პროცესები და მიღებულია შესწორების კოეფიციენტი ნივთიერებათა ხარჯის დასაზუსტებლად;

6. კომპიუტერული მოდელირების გზით გამოკვლეულია სხვადასხვა სიჩქარისა და ტემპერატურის მქონე ნაკადების შერევის პროცესები თბოცვლის გათვალისწინებით;
7. სხვადასხვა ტემპერატურის მქონე სითხის ნაკადების შერევის დროს მიღებული სიჩქარისა და ტემპერატურის განაწილების კანონები საშუალებას იძლევა გაკეთდეს შერევის არეში ნივთიერების ხარჯისა და ტემპერატურის პროგნოზი, რაც მნიშვნელოვანია, სისტემის სწორი პროექტირებისათვის.

**სამუშაოს აპრობაცია.** დისერტაციის ძირითადი დებულებები და შედეგები მოხსენებული იყო საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებზე და თემატურ სემინარებზე.

საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციები:

1. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია “ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები” 21-22 მაისი, 2010. ქუთაისი;
2. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 78-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. მაისი, 2010წ;
3. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 79-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. მაისი, 2011წ;

თემატურ სემინარები:

I-თემატური სემინარი - “კომპიუტერული პროგრამების ადაპტაცია თბოტექნიკური ვირტუალური ამოცანების შესაქმნელად;

II-თემატური სემინარი – “სითხეში ჩაძირული წრის და რკალების მცოცავი რეჟიმით გარსდენის შესწავლა პროგრამული პაკეტების GAMBIT და FLUENT-ის გამოყენებით

**ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში**

1. გიგიტელშვილი კ., კილურაძე დ., კილურაძე ო. სითხის ნაკადის რეჟიმების მოდელირება თანამედროვე პროგრამული პაკეტების გამოყენებით. “ენერგია” №3(59). 2011. გვ. 79-84.

2. კიღურაძე დ., გიგიტელშვილი კ., კიღურაძე ო. სხვადასხვა სხეულების სითხით გარსდენის კომპიუტერული მოდელირება. “ენერგია” №4(60). 2011. გვ. 14-16.

3. **Kiguradze D, Gigitelashvili K, Kiguradze O. Computer modeling of laminar flow of circles and arcs submerged in fluid.** საერთაშორისო ინტერნეტ-ჟურნალი [www.energyonline.ge](http://www.energyonline.ge). ნომერი 1 (6), 2012 წ.

4. გიგიტელშვილი კ. ღრმულის ნაკადით გარსდენის მოდელირება პროგრამული პაკეტებით. “ენერგია” №1(61). 2012. გვ. 40-43.

5. გიგიტელშვილი კ. პროგრამების FLUENT-ის და GAMBIT-ის გამოყენება ნაკადების მოძრაობის რეჟიმების შესასწავლად. სტუდენტთა 78-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის შრომათა თეზისების კრებული. 2010. თბილისი.